

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МАКСИМЧУК ВІТАЛІЙ ФЕДОРОВИЧ



УДК 621.311

**ІНТЕГРОВАНА ГАЛУЗЕВА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ОБЛАДНАННЯ
ГОСПОДАРСТВА ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
УКРЗАЛІЗНИЦІ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі автоматизації електричних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України.

**Науковий
керівник:**

доктор технічних наук, професор, академік
Національної академії наук України
Стогній Борис Сергійович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук
України, головний науковий співробітник відділу
автоматизації електричних систем.

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, професор
Денисюк Сергій Петрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Інститут енергозбереження та
енергоменеджменту, директор;

кандидат технічних наук, професор
Рубаненко Олександр Євгенійович,
Вінницький національний технічний університет
МОН України, доцент кафедри електричних станцій
та систем.

Захист дисертації відбудеться 19 жовтня 2020 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 16 вересня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна електроенергетична галузь через стрімкий розвиток передових інформаційних технологій перетворилася на інформатизовану та інтелектуалізовану енергетику з єдиним загальноенергетичним середовищем та інформаційною інфраструктурою. Такому її стану можна завдячувати лише впровадженням високонадійних інформатизованих комплексів, що забезпечують ефективну та надійну роботу як електроенергетичних систем (ЕЕС) в цілому, так і електроенергетичних об'єктів (ЕЕО) зокрема. Переважаюче за своїми обсягами місце серед впроваджених займають системи моніторингу та засоби інформаційного обміну між ними. Потужні інформаційно-діагностичні комплекси були впроваджені також на тягових підстанціях систем електропостачання Укрзалізниці.

В Україні на сьогоднішній день існує 6 залізниць, в яких переважна більшість колій є електрифікованими. Живлення електрифікованих ділянок залізниць забезпечують близько 400 тягових підстанцій змінного та постійного струму.

Контактна мережа, тягові підстанції, пости секціонування контактної мережі, системи сигналізації та централізованого блокування, допоміжні пристрої та системи є базою електрифікованих залізниць та утворюють структуру, що дає можливість експлуатації електрорухомого складу, а отже забезпечує перевезення пасажирів, вантажів, тощо.

Основні перераховані елементи електрифікованих залізниць в переважній більшості своїй введені в експлуатацію в середині минулого сторіччя з усіма відомими наслідками, які з цього випливають, важливим з яких є вихід з ладу обладнання внаслідок вичерпання свого ресурсу.

Безаварійна та ефективна робота сучасної залізниці у значній мірі зумовлена надійністю електропостачання, рівнем автоматизації тягових підстанцій та процесів розподілу електричної енергії вздовж залізничної колії. Пристрої сигналізації та централізованого блокування (СЦБ) у значній мірі впливають на якість та безпеку роботи як електрифікованого залізничного транспорту, так і залізничниць без електрифікації. Живлення пристроїв СЦБ забезпечується повітряними лініями змінного струму напругою 6-10 кВ. Сумарна довжина цих ліній в Україні складає десятки тисяч кілометрів, що вказує на велику ймовірність виникнення пошкоджень, а тому є нагальна необхідність розв'язання існуючих проблем і забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання.

Досвід експлуатації вказує на те, що на лініях СЦБ найбільш часто виникають замикання однієї фази на землю. Це порушення нормального режиму роботи лінії виникає внаслідок погіршення стану ізоляції або торкання проводів зеленими насадженнями, розташованими вздовж лінії. Незважаючи на наявність резервного живлення споживачів СЦБ замикання на землю необхідно швидко ліквідувати. Це зумовлено тим, що підвищення напруги непошкоджених фаз, що має місце в цьому випадку, може дуже швидко привести до переходу замикання на землю у коротке замикання, а також приводить до прискорення зношеності електрообладнання. Для скорочення часу усунення дефекту необхідно швидко знайти місце виникнення

цього дефекту. У мережі з заземленою нейтраллю методи визначення місця виникнення локального дефекту базуються на розрахунку опору лінії до замикання на підставі параметрів аварійного режиму.

У мережі з ізольованою нейтраллю (до якої відносяться лінії СЦБ 10 кВ) режим замикання на землю супроводжується відносно незначною зміною значень фазних струмів, що суттєво утруднює визначення місця локального дефекту ізоляції. Оскільки замикання на землю (в тому числі й у мережі з ізольованою нейтраллю) супроводжуються появою струмів і напруг нульової послідовності, то ці параметри найбільш часто використовують для визначення місця замикання.

Необхідно відмітити негативний вплив лінії «два проводи-рейка» (ДПР) напругою 27,5 кВ, що є резервною лінією СЦБ, та контактного проводу фідера контактної мережі (ФКМ) на робочу лінію СЦБ. Індукована напруга на фазах лінії суттєво змінює значення напруг фаз лінії СЦБ по відношенню до землі. У зв'язку з цим скорочується термін роботи електрообладнання і збільшується кількість замикань на землю, що впливає на надійність роботи автоматики залізниці.

Розвитку теоретичних основ систем керування та моніторингу в енергетиці та створенню високоефективних інформатизованих засобів контролю, управління та моніторингу в системах електропостачання, в тому числі і електрифікованих залізниць присвячені роботи українських вчених – Стогнія Б.С., Кириленка О.В., Яндульського О.С., Денисюка С.П., Праховника А.В., Танкевича Є.М., Буткевича О.Ф., Лежнюка П.Д., Жукова С.Ф., Гребченка М.В., Стасюка О.І., Сиченка В.Г., Доманського В.Т. та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертаційної роботи здійснювалися в процесі виконання плану науково-дослідної роботи Інституту електродинаміки НАН України «Розвиток наукових основ створення глобальної системи моніторингу об'єднаної електроенергетичної системи», шифр теми «Синхрон-2», №ДР0112U008206, 2013-2017 р.р. та Науково-технічного проекту «Програмно-технічний комплекс діагностування мереж сигналізації, централізації та блокування залізничного транспорту», № ДР 0118U001724, 2018 р., в яких Максимчук В.Ф. був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення на основі апаратно-програмного комплексу (АПК) «Регіна» інтегрованої галузевої системи моніторингу електротехнічного обладнання системи електропостачання залізниць, включно з розробкою нового методу визначення місця пошкодження на лініях СЦБ.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Аналіз особливостей і характеристик основного електротехнічного обладнання, яке підлягає моніторингу;
2. Розробка вимог, структури та визначення функціональних можливостей інтегрованої галузевої системи моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці;
3. Дослідження режимів роботи нейтралі ліній СЦБ, враховуючи негативні електромагнітні впливи від фідерів контактної мережі та повітряних

ліній «два проводи-рейка», а також наведені потенціали, що виникають через ємнісні зв'язки з лініями більш високої напруги;

4. Аналіз методів визначення пошкоджень на лініях з ізолюваною нейтраллю з метою удосконалення алгоритмів визначення відстані до місця однофазного замикання на землю на лініях СЦБ;

5. Розробка математичної моделі вузла електричної системи з повітряною лінією СЦБ, яка враховує наявність навантаження та вплив контактної мережі та інших можливих чинників;

6. Розробка одностороннього методу визначення відстані до замикання на лініях СЦБ, який не потребує відключення лінії й забезпечує необхідну точність;

7. Експериментальна перевірка основних результатів дисертаційної роботи.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в основному електротехнічному обладнанні системи електропостачання залізниць.

Предмет дослідження – система моніторингу режимів роботи основного електротехнічного обладнання системи електропостачання залізниць.

Методи дослідження – метод вузових потенціалів у матричній формі з метою проведення перевірки алгоритмів визначення відстані до місця пошкодження та дослідження впливу різних факторів; моделювання впливу електричного та магнітного полів з метою оцінки електромагнітного впливу на режими роботи систем автоматики; системний аналіз впливу різних факторів на вимірювані параметри режиму електричного обладнання залізниці; методи гармонічного аналізу; цифрова фільтрація; експериментальні (натурні) дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено метод автоматичного моніторингу параметрів робочих режимів ліній електропостачання пристроїв СЦБ залізниць, що полягає в під'єднанні до усіх фаз лінії на її початку спеціально вибраних конденсаторів, з'єднаних за схемою «зірка» з заземленою нульовою точкою, вимірювання векторів струмів фаз і векторів напруг фаз відносно землі та використанні як показників моніторингу параметрів вектора струму нульової послідовності та амплітудних значень першої та вищих гармонік напруги пошкодженої фази, що дало змогу визначати місце однофазного замикання на землю на лініях СЦБ без виведення їх з експлуатації.

2. Вперше за результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено функціональні залежності параметрів робочих режимів лінії СЦБ від значення ємностей конденсаторів, увімкнених між фазами лінії та землею; відстані до місця однофазного замикання на землю (ОЗЗ); параметрів взаємного розташування ліній СЦБ, ДПР та фідерів контактної мережі (ФКМ), що покладені в основу розроблення нової моделі лінії СЦБ.

3. Вперше розроблено математичну модель лінії СЦБ, яка на відміну від відомої моделі повітряної лінії напругою 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю, дозволяє врахувати електромагнітний вплив сусідніх ліній ДПР та ФКМ на струми

та напруги лінії СЦБ, підвищити точність визначення віддалі до місця її пошкодження.

Практичне значення одержаних результатів визначається їхнім безпосереднім спрямуванням на створення і побудову технічно досконалої та економічно раціональної ієрархічної галузевої системи моніторингу і забезпечується високими техніко-економічними показниками окремих підсистем, з яких вона складається, а саме: цифрової реєстрації параметрів процесів; обробки, аналізу та візуалізації даних; зв'язку компонентів системи; синхронізації даних вимірювань, а також використанням стандартних інформаційних та програмних технологій, модульним принципом побудови, можливостями розширення при розбудові об'єкту моніторингу і модернізації програмно-технічних засобів.

Цінними для практики експлуатації залізниць є результати численних натурних експериментів з визначення та дослідження параметрів нормального, аварійного і післяаварійного режимів ліній СЦБ (струмів і напруг фаз та їх симетричних і гармонічних складових, активних та реактивних повздовжніх опорів, ємностей фаз відносно землі та між фазами), а також встановлені на цій основі функціональні залежності параметрів режимів від факторів, які на них впливають.

Розроблений автором метод визначення місця пошкодження на лінії СЦБ реалізований в промисловому виробництві базового компонента інтегрованої системи – апаратно-програмному комплексі (АПК) «Регіна».

Елементи інтегрованої галузевої системи моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці впроваджено на тягових підстанціях (ТП) «Бобрик», «Іскорость», «ім. Т. Шевченко» Південно-Західної залізниці. Це дало змогу підвищити надійність, безпеку та ефективність функціонування системи електропостачання залізниці, забезпечити оперативний персонал максимально повною та достовірною інформацією про стан її електроенергетичних об'єктів.

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, що представлені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

В наукових працях, які опубліковані в співавторстві, здобувачу належать такі результати: розроблено математичну модель електричної мережі електропостачання для проведення досліджень з визначення місця однофазного замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю [1, 11]; проведено розробку методу та створення структури системи визначення відстані до місця замикання фази на землю та визначення опору в місці замикання повітряних ліній у нерозгалужених мережах з ізолюваною нейтраллю [2]; вдосконалення методу визначення відстані до місця замикання на землю повітряної лінії в мережі з ізолюваною нейтраллю з використанням результатів експериментальних досліджень [3]; проведено аналіз чинників впливу на точність визначення відстані до замикання на землю в лініях з ізолюваною нейтраллю в умовах електромагнітного впливу від сусідніх ліній [4]; вдосконалено метод визначення

відстані до місця замикання на землю [5]; обґрунтовано доцільність застосування шифратора для вводу дискретної інформації [6]; зроблено аналіз впливу запасу надійності по струму та тиску газу на глибину діагностування технічного стану елегазових вимикачів [7]; визначено параметри синхронного вимірювання первинних сигналів режимів функціонування енергосистеми [8]; обґрунтовано доцільність застосування шифратора для вводу аналогової інформації [9]; проведено розробку алгоритмів та структури системи автоматичного контролю ізоляційних характеристик основної ізоляції високовольтних вводів силових трансформаторів [10]; розроблено структуру глобальної інформаційної системи безперервного моніторингу та діагностування тягових підстанцій електрифікованих залізниць [12]; проведено розробку алгоритмів моніторингу стану основного електротехнічного обладнання [13]; розроблено структуру нового інтелектуального оперативно-інформаційного комплексу для отримання інформації про основні режими роботи та стан обладнання тягових підстанцій [14]; запропоновано метод визначення однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю [15].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на міжнародних науково-технічних конференціях та міжнародному симпозіумі, а саме:

- II Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи ESS'11» (Україна, м. Київ 7-10 червня 2011 р.);
- 7-м Международном симпозиуме «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта Eltrans'2013» (Россия, г. Санкт-Петербург 8-11 октября 2013 г.);
- VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація залізничного транспорту Транселектро – 2015» (Україна, м. Одеса 29 вересня – 2 жовтня 2015 р.);
- 2nd International Conference «Intelligent Energy and Power System IEPS-2016» (Україна, м. Київ 7-11 червня 2016).

Публікації. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень опубліковані у 15 наукових працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 6 патентів на корисну модель, 3 доповіді у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій та 1 теза доповіді у збірнику тез доповідей міжнародного симпозіуму.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 208 сторінках машинописного тексту, складається з переліку скорочень та умовних позначень, анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 187 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 23 таблицями і 30 рисунками. Список використаних джерел містить 148 найменувань, з них 85 кирилицею та 63 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проведено обґрунтування вибору теми роботи, сформульована мета та задачі наукових досліджень, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, показана наукова новизна та практична значимість отриманих результатів дисертації, наведені дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі розглянуті особливості роботи електроенергетичних об'єктів систем електропостачання залізниць та визначені проблеми моніторингу режимів їх роботи, проаналізований сучасний стан проблеми пошуку місця замикання на землю в лініях з ізолюованою нейтраллю та існуючі методи визначення відстані до нього.

Виконаний аналіз практики експлуатації електротехнічного обладнання господарства електропостачання та впроваджених більш як на 150 тягових підстанціях Укрзалізниці локальних цифрових пристроїв моніторингу параметрів його режимів. Використання результатів цього дослідження дозволило обґрунтувати нагальну потребу в розширенні переліку і покращенні якості виконуваних цими пристроями функцій та їх об'єднанні в єдину багаторівневу інформаційну мережу.

Показано, що забезпечення надійного функціонування систем електропостачання залізниць з електричною тягою можливе лише за умови постійного моніторингу як режимів їх роботи, так і стану основного електротехнічного обладнання, яке відповідає за надійне електропостачання електричної тяги. Моніторингу повинні підлягати системоутворюючі елементи тягових підстанцій (силові трансформатори і автотрансформатори, комутаційні апарати), контактна мережа, мережі автоблокування та ДПР, а також лінії живлення напругою 110-150 кВ.

При створенні засобів моніторингу систем електропостачання залізниць необхідно враховувати особливості їхнього функціонування та характерні ознаки побудови, які можуть виникати у випадках динамічних навантажень, пов'язаних з рекуперацією енергії, нерівномірністю графіків її споживання та наявністю негативних факторів, що впливають на якість електричної енергії, а саме зношеність застарілого обладнання та його оновлення.

Для ліній з ізолюованою нейтраллю, як об'єктів моніторингу, важливе швидке усунення дефектів, які пов'язані з замиканнями на землю. Проведення моніторингу стосується в основному визначення відстані до місця замикання, а також швидкого усунення причин його появи. При створенні алгоритмів необхідно враховувати режими роботи нейтралі лінії та негативні електромагнітні впливи від контактної мережі та ДПР, а також наведені потенціали, що виникають через ємнісні зв'язки з лініями більш високої напруги.

Проведено масштабний і ґрунтовний аналіз відомих методів визначення місця ОЗЗ в мережах з ізолюованою нейтраллю. Виконано їх класифікацію за способом застосування: з виведенням лінії з експлуатації і без виведення; за вхідними величинами (даними): повний опір до місця пошкодження, гармонічний

склад струмів та напруг, енергія електричного чи магнітного поля навколо проводу пошкодженої фази та ін.); за кількістю встановленого на лінії обладнання: на одному її кінці, на обох кінцях, вздовж лінії.

За результатами аналізу встановлено, що визначення відстані до місця пошкодження з виведенням лінії з експлуатації, яке в основному базується на застосуванні методів імпульсної рефлектометрії вимагає додаткових затрат на формування високочастотних сигналів, а також встановлення по всій довжині лінії додаткового вимірювального обладнання, що не завжди є виправданим як з технічної та економічної сторін. До того ж похибка визначення відстані до місця пошкодження знаходиться в значній залежності від опору в місці замикання, а також залежить від наведеної напруги, що для ліній з ізолюваною нейтраллю ускладнює визначення відстані до місця ОЗЗ.

Існуючі методи визначення віддалі до місця пошкодження без виведення лінії з експлуатації своєю більшістю адаптовані під розподільчі мережі з ізолюваною нейтраллю, де точність пов'язана з їх конфігурацією та введеними параметрами еквівалентної схеми. Встановлено, що найбільш точну оцінку відстані до місця ОЗЗ серед цих методів забезпечують методи, що ґрунтуються на теорії хвильових процесів в лініях. Однак їх практична реалізація пов'язана з необхідністю розв'язання низки проблем технічного та програмного характеру, таких як визначення точної довжини лінії включно з довжиною проводів від трансформатора струму (ТС) чи напруги (ТН) до пристрою моніторингу, забезпечення потрібних частотних характеристик ТС і ТН, реалізації процесу дуже швидкого збору даних до декількох сотень тисяч вибірок сигналів в сек., фіксації в режимі реального часу високочастотних спектрів і моментів їх надходження, що в свою чергу потребує використання вейвлет аналізу та кореляційного аналізу сигналів і відповідно досить потужних процесорів та значних об'ємів оперативної пам'яті.

Виходячи з результатів проведеного аналізу, з урахуванням специфічності побудови, умов експлуатації і параметрів режимів ліній СЦБ, зроблено висновок про те, що раціональне розв'язання поставлених в роботі завдань щодо вдосконалення алгоритмів визначення місця ОЗЗ має ґрунтуватися на встановлених кореляційних зв'язках відстані до місця ОЗЗ з однією чи кількома вхідними аналізованими величинами - показниками моніторингу. Це потребуватиме проведення значної кількості попередніх моделювань електромагнітних перехідних процесів в лінії, а застосування відповідних методів визначення відстані до ОЗЗ вимагатиме досконалого їх тестування безпосередньо на лініях СЦБ.

Другий розділ присвячено моделюванню елементів системи електропостачання, нормальних і аварійних режимів роботи ліній живлення системи централізованого автоблокування залізниць і натурним експериментам з визначення параметрів ліній і параметрів їх режимів.

Досліджено та встановлено характерні особливості одного з найвідповідальніших об'єктів моніторингу - ліній електроживлення пристроїв сигналізації, централізації та блокування залізничного транспорту та їх

навантажень. Насамперед, це належність до першої категорії забезпечення надійності електропостачання і, відповідно, надто висока ціна відмов та пошкоджень; виконання і робота з ізольованою нейтраллю; безпосереднє сусідство з лініями резервного живлення пристроїв СЦБ - високовольтними лініями ДПР напругою 27,5 кВ та фідерами контактної мережі; нелінійність та нерівномірна розподіленість навантаження, що складається з 4-6 трифазних та 30-40 однофазних трансформаторів, увімкнених на різні міжфазні напруги. Лінії ДПР виконуються трьома фазами, одна з яких – фаза *C* з'єднується з землею. Навантаження фаз порівняно незначне, проте існує практично постійно. Лінії ФКМ виконуються, як правило, з однією фазою, зазвичай *A* чи *B*, а фаза *C* з'єднується з рейками. Навантаження на ФКМ залежить від кількості потягів, які на даний час знаходяться на лінії і тому повинні враховуватись в «*online*» режимі.

Проведені численні натурні експерименти для визначення параметрів лінії СЦБ і параметрів нормальних та аварійних режимів її роботи (активних та реактивних повздовжніх опорів, ємностей фаз відносно землі та між фазами струмів і напруг та їх симетричних і гармонічних складових), параметрів впливів від ліній ДПР і ФКМ, запису осцилограм і побудови векторних діаграм струмів та напруг. Через відсутність розгалуженої мережі від трансформатора, який живить лінію СЦБ, при виникненні замикань на землю на початку лінії завжди відсутні струми нульової послідовності, які зазвичай мають місце при замиканнях на землю в лініях з ізольованою нейтраллю. Цими дослідженнями доведено, що заземлення нейтралі живлячого лінію СЦБ трансформатора, здійснюване при визначенні місця однофазного замикання на землю, рівноцінне заземленню нульової точки «зірки» трьох спеціально підібраних конденсаторів, що підключені до кожної з фаз лінії на її початку, ємності яких розраховуються у відповідності до параметрів мережі. Показано, що включення конденсаторів сприяє зниженню несиметрії напруг робочих режимів лінії СЦБ, дозволяє підвищити чутливість засобів визначення місця ОЗЗ.

Експериментально встановлені функціональні залежності параметрів режимів роботи лінії СЦБ від значення ємностей конденсаторів, увімкнених між фазами лінії та землею (рис. 1); відстані до місця ОЗЗ; параметрів взаємного розташування лінії СЦБ, лінії ДПР та ФКМ.

Отримані залежності використані при розробці математичної моделі лінії СЦБ, що ґрунтується на використанні П-подібної схеми заміщення лінії з ізольованою нейтраллю з зосередженими параметрами, і яка, на відміну від відомої моделі повітряної лінії напругою 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю, дозволяє врахувати ємнісні та індуктивні зв'язки лінії СЦБ з сусідніми лініями ДПР і ФКМ та відповідно їх вплив на струми та напруги лінії СЦБ.

Наведена на лінії СЦБ напруга зумовлена наявністю ємнісного зв'язку між контактною мережею і повітряною лінією СЦБ визначається за наступним виразом:

$$U_E = U \frac{C_1 \cdot l_1}{C_2 \cdot l_2}, \quad (1)$$

де U – напруга контактної мережі; C_1 – ємність між контактною мережею та лінією СЦБ; C_2 – ємність між лінією СЦБ та землею; l_1 – довжина контактної мережі 27,5 кВ; l_2 – довжина лінії СЦБ або її ділянки.

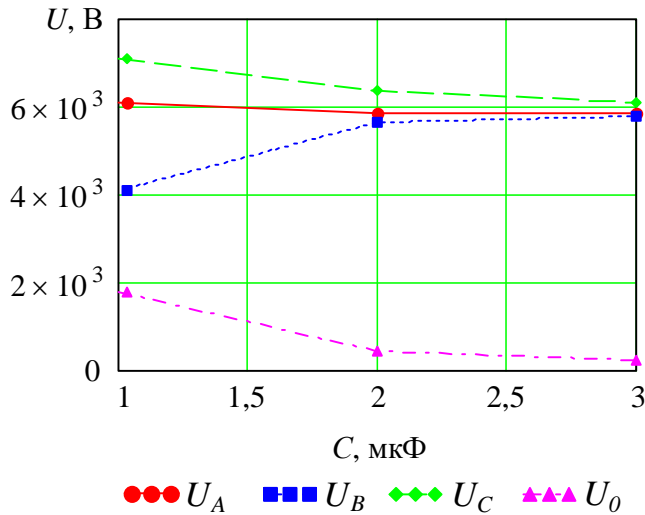


Рис. 1. Залежність діючих значень напруг фаз по відношенню до землі від значення встановлених ємностей між фазами лінії СЦБ та землею

Магнітний вплив контактної мережі на лінію СЦБ, зумовлений проходженням струму в контактній мережі, проявляється у наведенні поздовжньої електрорушійної сили:

$$E_M = \omega \cdot I_p \cdot k_F \cdot \lambda \cdot M \cdot l, \quad (2)$$

де ω – кутова частота; I_p – розрахунковий струм контактної мережі на ділянці зближення з лінією СЦБ, А; k_F – коефіцієнт, що враховує гармонічні складові в тяговому струмі; λ – коефіцієнт екрануючої дії рейок; M – коефіцієнт взаємної індукції між контактною мережею та лінією СЦБ; l – довжина паралельного зближення контактної мережі з лінією СЦБ.

Математичне моделювання режимів роботи вузла електричної системи лінія СЦБ – трансформатор виконувалося без урахування впливу лінії ДПР і з його урахуванням згідно з моделлю рис. 2.

На рис.2 використано наступні позначення: $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C, Y_A, Y_B, Y_C$ – комплексні е.р.с. та провідності джерела живлення; $Y_4, Y_5, Y_6, Y_{16}, Y_{17}, Y_{18}$ – комплексні поздовжні провідності лінії СЦБ; $Y_7, Y_8, Y_9, Y_{13}, Y_{14}, Y_{15}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}$ – комплексні поперечні провідності лінії; $Y_{10}, Y_{11}, Y_{12}, Y_{19}, Y_{20}, Y_{21}$ – комплексні провідності навантаження лінії СЦБ; Y_N – комплексна провідність заземлення нейтралі трансформатора; $\dot{E}_{ДПР}$ – комплексна е.р.с. від впливу ФКМ та лінії ДПР, що знаходяться під напругою 27,5 кВ; Y_{29} – комплексна провідність від впливу ФКМ та ДПР; Y_{26}, Y_{27}, Y_{28} – комплексні провідності, перераховані відповідно для фаз А, В, С; $\dot{I}_{26}, \dot{I}_{27}, \dot{I}_{28}$ – комплексні струми, перераховані відповідно для фаз А, В, С.

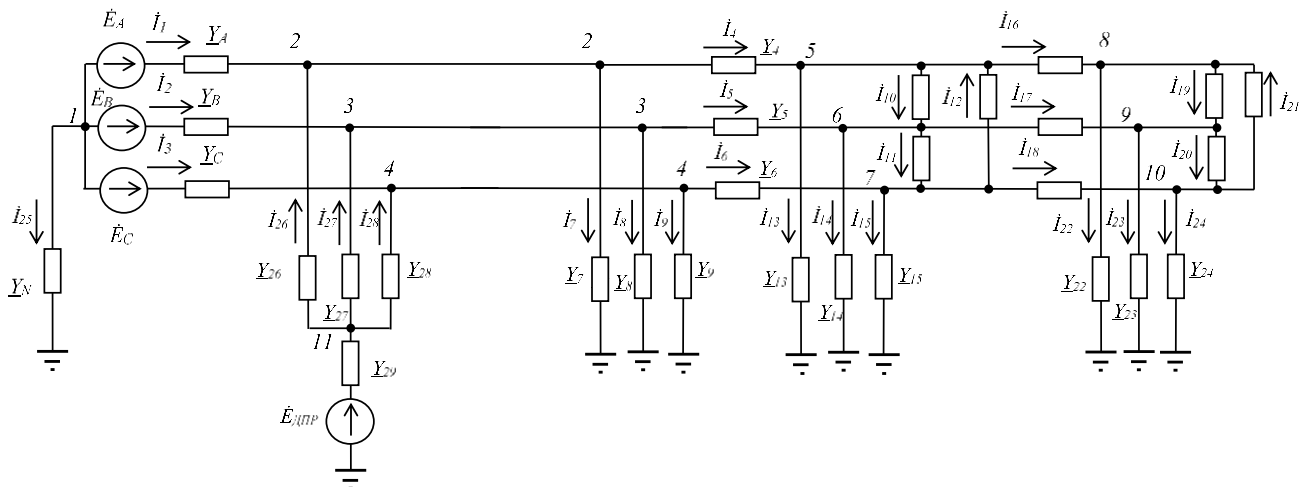


Рис. 2. Схема заміщення вузла електричної системи з лінією СЦБ з урахуванням впливу від ФКМ та лінії ДПР

Для розрахунку режимів обрано метод вузлових потенціалів у матричному вигляді. Рівняння для визначення потенціалів вузлів схеми має вигляд:

$$\varphi = \|g^{(y)}\|^{-1} \cdot J^{(y)},$$

де $\|g^{(y)}\|^{-1}$ – матриця, зворотна до матриці вузлових провідностей $g^{(y)}$,

$$g^{(y)} = A \cdot g \cdot A^T,$$

де A – матриця з'єднань, $J^{(y)}$ – матриця-стовпець вузлових струмів.

Струми фаз визначаються за наступними співвідношеннями:

$$\dot{I}_1 = y_A \cdot (\varphi_0 - \varphi_1 - \dot{E}_A),$$

$$\dot{I}_2 = y_B \cdot (\varphi_0 - \varphi_2 - \dot{E}_B),$$

$$\dot{I}_3 = y_C \cdot (\varphi_0 - \varphi_3 - \dot{E}_C),$$

де $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – потенціали вузлів, відповідно 1, 2, 3, 4, що визначаються в результаті розрахунку.

У третьому розділі розроблений метод визначення місця замикання на землю в електричній мережі системи централізованого автоблокування залізниць з використанням параметрів режимів, проведене експериментальне оцінювання його точності.

Основа алгоритму визначення місця замикання полягає в тому, що при значенні опору всієї лінії \underline{Z}_L визначається опір ділянки лінії від початку лінії (місце встановлення трансформаторів струму) до місця замикання $\underline{Z}_L^* = R_L^* + jX_L^*$. Потім необхідно розділити визначене значення \underline{Z}_L^* на питомі параметри лінії й таким чином визначити відстань l_3 до місця замикання.

Опір \underline{Z}_L^* може бути розрахований шляхом ділення падіння напруги на цьому опорі U_L^* від струму лінії у пошкодженій фазі \dot{I}_A . Схема заміщення, яка відповідає цьому випадку, наведена на рис. 3.

Відповідно до схеми заміщення (рис. 3) на підставі закону Кірхгофа рівняння для напруги пошкодженої фази лінії на початку лінії (без врахування зміни значення струму \dot{I}_A вздовж лінії через наявність на ній розподіленого навантаження):

$$\dot{U}_{A0} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^* + \dot{I}_3 \cdot R_3. \quad (3)$$

Необхідні для розв'язку рівняння (3) значення напруги \dot{U}_{A0} і струму \dot{I}_A безпосередньо вимірюються вимірювальними трансформаторами, а значення струму \dot{I}_3 через перехідний опір R_3 в місці ОЗЗ визначається з наступного виразу:

$$\dot{I}_3 = 3\dot{I}_0 + \dot{I}_{B_{\text{влс}}} + \dot{I}_{C_{\text{влс}}}, \quad (4)$$

де $\dot{I}_{B_{\text{влс}}}, \dot{I}_{C_{\text{влс}}}$ – вектори ємнісних струмів, які зумовлені власними ємностями фаз B і C по відношенню до землі і визначаються з врахуванням реальних напруг відповідних фаз:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B_{\text{влс}}} &= \dot{U}_{B0} \cdot (-j\omega C_{B_{\text{влс}}}), \\ \dot{I}_{C_{\text{влс}}} &= \dot{U}_{C0} \cdot (-j\omega C_{C_{\text{влс}}}). \end{aligned}$$

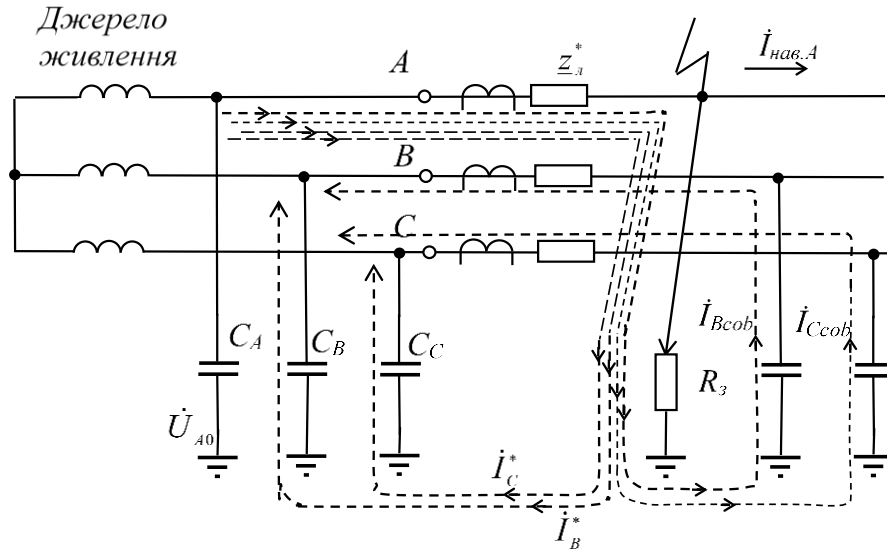


Рис.3. Схема заміщення ділянки лінії СЦБ з встановленими конденсаторами при замиканні фази А на землю

Розв'язок рівняння (3) полягає у визначенні координат точки *Д* перетину векторів падінь напруг $\dot{I}_3 \cdot R_3$ та $\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^*$ на векторній діаграмі (рис.4). У трикутнику *ОДЕ* одна із сторін \dot{U}_{A0} відома на підставі вимірювань. Тому визначаються кути α , β та γ , і на підставі використання теореми синусів або подібних теорем, що відображають співвідношення кутів та сторін трикутника, визначається падіння напруги $\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^*$ на ділянці лінії з опором \underline{Z}_L^* :

$$\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^* = \dot{U}_{A0} \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}.$$

Далі визначається комплексний опір ділянки лінії від її початку до місця замикання:

$$\underline{Z}_L^* = \frac{\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^*}{\dot{I}_A}.$$

Розрахункова відстань до точки замикання у відносних одиницях по відношенню до всієї довжини лінії:

$$b_r = \frac{\underline{Z}_L^*}{r_0 \cdot l_{\text{СЦБ}} + j \cdot x_0 \cdot l_{\text{СЦБ}}}.$$

Похибка визначення відстані по відношенню до дійсного її значення (в математичній моделі до заданого):

$$\Delta b\% = \frac{|b_r| - b}{b} \cdot 100\%.$$

Перехідний опір у місці замикання знаходиться з виразу (3):

$$R_3 = \frac{\dot{U}_{A0} - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^*}{\dot{I}_3}.$$

Якщо відомо значення R_3 , то з'являється можливість припустити характер або вид замикання –

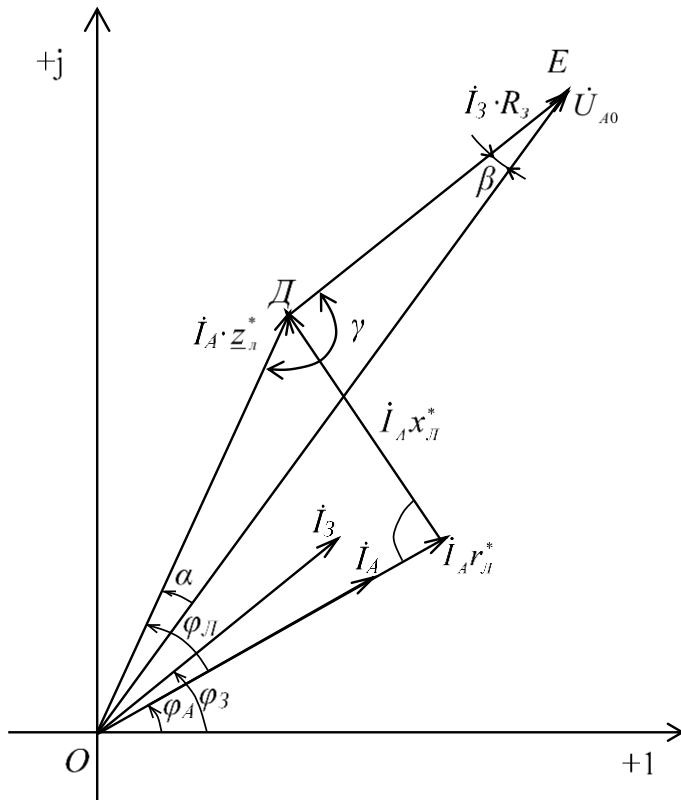


Рис.4. Векторна діаграма струмів

металічне або через дерево. Завдяки цьому зменшується час на пошук місця пошкодження та його усунення.

На математичній моделі вузла системи з лінією СЦБ досліджено залежності похибки визначення місця замикання на землю на лінії запропонованим методом від відстані до нього при використанні вимірювальних трансформаторів струму і напруги класів точності 0,2 і 0,5; зміні навантаження лінії від $0,2Z_{\text{ном}}$ до $Z_{\text{ном}}$, різних значеннях перехідного опору R_3 в місці ОЗЗ, різних значеннях ємностей конденсаторів, увімкнених між фазами і землею без урахування впливу лінії ДПР і ФКМ. Результати одного з таких досліджень за умови номінального навантаження лінії $Z_{\text{ном}}$, значенні опору у місці замикання $R_3 = 10$ Ом подано в табл. 1.

Таблиця 1. Похибка визначення місця ОЗЗ Δb , %.

Ємність конденсаторів	Відстань до точки замикання, b, в.о.									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,99
$C_A=C_B=C_C=0$	0,79	0,35	0,24	0,21	0,22	0,27	0,33	0,41	0,5	0,6
$C_A=C_B=C_C=1 \times 0,64$ мкФ	-2,24	-0,46	-0,18	-0,34	-0,72	-1,24	-1,87	-2,59	-3,38	-4,15
$C_A=C_B=C_C=2 \times 0,64$ мкФ	0,14	0,1	0,11	0,04	-0,07	-0,21	-0,37	-0,55	-0,75	-0,95

За результатами цих досліджень встановлено, що максимальне значення похибки Δb в будь-якій точці лінії за увімкнених на її початку конденсаторів ємністю $2 \times 0,64$ мкФ, значенні перехідного опору R_3 в місці ОЗЗ з діапазону 0,1-100 кОм та інших зазначених вище умов не перевищує 10%.

Для визначення точності запропонованого методу в реальних умовах експлуатації лінії СЦБ за умов наведеної на ній напруги від лінії ДПР та ФКМ виконано серію натурних експериментів з 15-ти металічних ОЗЗ в усіх фазах лінії в трьох її точках, що знаходились на різній відстані від початку лінії. Здійснений запис осцилограм струмів фаз і напруг фаз по відношенню до землі, визначений їх гармонічний склад і побудовані узагальнені залежності параметрів режиму лінії від відстані до місця ОЗЗ (рис.5).

Встановлено, що чим далі місце замикання від джерела живлення, тим сильніше спотворюються струми й напруги за рахунок вищих гармонік, причиною виникнення яких є нелінійність навантаження лінії. При цьому співвідношення окремих гармонік в повних сигналах залежить від відстані до місця ОЗЗ. Амплітуди першої гармоніки струмів фаз та напруг фаз по відношенню до землі майже у всіх дослідках зменшуються при зростанні відстані до місця замикання. Встановлено, що безпосереднє використання повних значень цих величин та їх перших гармонік для визначення місця замикання неможливе через неприпустимі похибки. В роботі запропонована корекція значень параметрів режиму з високим рівнем вищих гармонік шляхом виділення першої гармоніки з повного сигналу та визначення амплітуди всього сигналу з використанням коефіцієнта його спотворення (рис. 5).

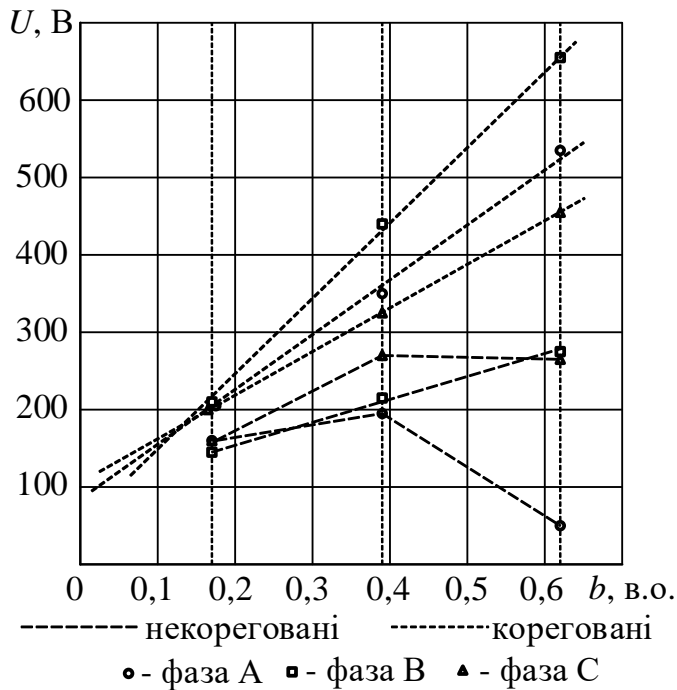


Рис.5. Залежність напруги пошкодженої фази відносно землі від відстані до місця замикання

За умови врахування ємнісних зв'язків і взаємної індукції лінії СЦБ і сусідніх ліній ДПР та ФКМ, що приводить до наведення напруги та повздовжньої електрорушійної сили, розподіленого вдовж лінії і змінного в часі навантаження лінії СЦБ, що зумовлює генерацію вищих гармонік в її струмах і напругах, похибка значно зростає і сягає рівня декількох десятків відсотків. З метою усунення додаткових складових похибки, зумовлених зазначеними факторами, в роботі запропоновано вдосконалений алгоритм визначення місця ОЗЗ на лінії СЦБ з автоматичним вибором розрахункових співвідношень в залежності від фази лінії, в якій виникло замикання, та від плинних значень коефіцієнту першої

гармоніки у напрузі пошкодженої фази (контролюється за допомогою допустимих значень $U_{1\text{доп}A}$, $U_{1\text{доп}1C}$, $U_{1\text{доп}2C}$) (рис.6). У фазі В лінії СЦБ залежність рівня першої гармоніки від відстані до місця замикання майже лінійна, тому для фази В використовується тільки один спосіб розрахунку відстані.

На рис. 6 прийняті наступні позначення: I_A , I_B , I_C , U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} – діючі значення струмів та напруг фаз лінії; b – відстань до місця замикання; $U_{1\text{доп}A}$, $U_{1\text{доп}1C}$, $U_{1\text{доп}2C}$ – допустимі значення першої гармоніки напруг фаз відповідно фази А та фази С, що дозволяють врахувати нелінійність розподілу першої гармоніки відповідних напруг вздовж лінії, конкретні допустимі їх значення обираються на підставі схеми розташування однофазних трансформаторів вздовж лінії або експериментальних даних; b_{rA} , b_{rB} , b_{rC} – розрахункові відстані до місця замикання відповідно фази А, В, С; R_z – опір між фазою й землею у місці замикання. Розрахунок, за яким відстань до місця ОЗЗ визначається відношенням уявної частини вектору коригованої напруги пошкодженої фази до уявної частини вектора коригованого струму цієї фази, позначено як спрощений метод. Розрахунок, за яким відстань визначається відношенням модуля вектору падіння коригованої напруги пошкодженої фази, який визначено з трикутника векторів напруг (рис. 4), до модуля вектору коригованого струму цієї фази, названо як метод трикутника. За рахунок використання в алгоритмі допустимих значень першої гармоніки враховуються особливості конкретної лінії СЦБ, а у разі визначення відстані до місця замикання автоматично обирається метод розрахунку, що забезпечує найменшу похибку.

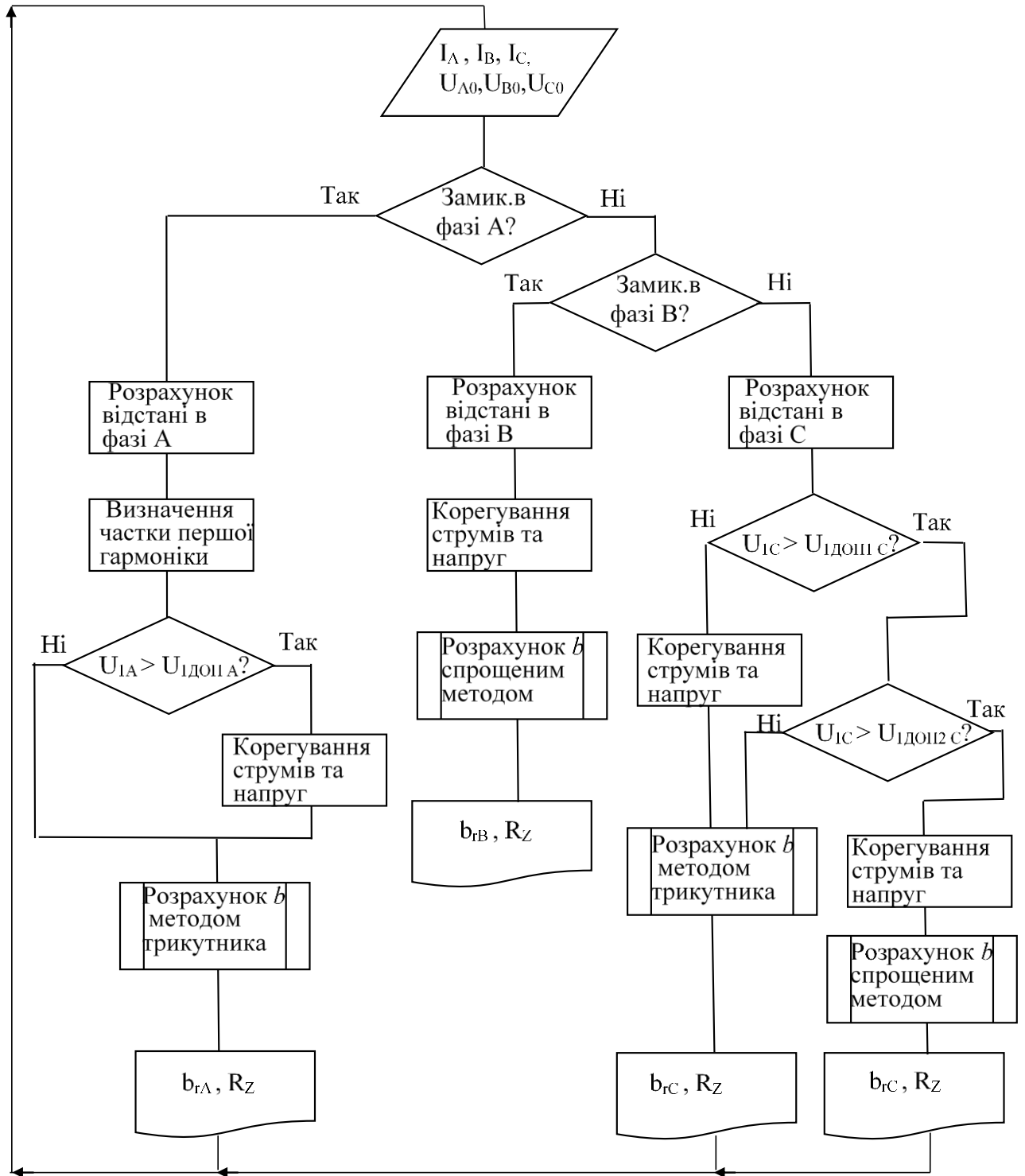


Рис.6. Вдосконалений алгоритм визначення відстані до місця замикання фази на землю

Підвищенню точності визначення місця ОЗЗ сприяє також включення до цього алгоритму математичного апарату точного визначення падіння напруги U_L^* пошкодженої фази на ділянці лінії до місця ОЗЗ з опором Z_L^* шляхом урахування кута α між вектором напруги \dot{U}_{A0} пошкодженої фази на початку лінії і вектором

падіння напруги на ділянці лінії до місця ОЗЗ $I_A \cdot Z_L^*$, максимальне значення якого в різних випадках складає від 9 до 12 град.

Показано, що похибка визначення місця ОЗЗ на лініях СЦБ за відсутності зовнішніх факторів впливу на неї не перевищує 1% для будь-якого місця замикання вздовж лінії. За сукупної дії внутрішніх та зовнішніх факторів впливу відносне значення похибки визначення відстані до місця можливого вздовж усієї довжини лінії ОЗЗ знаходиться в межах від -0,6% до -12,8%.

Четвертий розділ присвячений розробці та впровадженню інтегрованої галузевої системи моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці (СМОЕ).

Визначені технічні вимоги, яким повинен відповідати базовий компонент інтегрованої системи - системи моніторингу тягової підстанції, що відповідають державним та міжнародним стандартам для інформаційних систем енергетики. Це дозволяє СМОЕ інтегруватися до єдиного інформаційного комплексу разом з системами релейного захисту та управління та забезпечувати інформацією диспетчерські центри залізниці в нормальних, аварійних та післяаварійних режимах роботи обладнання.

Розкриттю функціональних особливостей СМОЕ сприяють вироблені принципи їх побудови, втілення яких дозволить опрацьовувати в реальному часі громіздкі масиви інформації зі збереженням необхідної точності та високої надійності. Структура СМОЕ, яку наведено в дисертаційній роботі, вибрана інтегрованою та ієрархічно орієнтованою у відповідності до виконуваних задач цифрової реєстрації параметрів процесів з подальшим аналізом та візуалізацією даних. Завдяки цьому інформація відображається на моніторах автоматизованого робочого місця (АРМ) чергового тягової підстанції та стає доступною для використання і дослідження черговим диспетчером дистанцій електропостачання, диспетчером диспетчерських пунктів дороги та черговим диспетчером центрального енергодиспетчерського пункту Укрзалізниці.

Створення у структурі СМОЕ підсистеми цифрової реєстрації параметрів процесів (рис. 7) дозволило формувати первинну інформацію про технологічні параметри роботи основного обладнання, проводити її накопичення, первинну обробку та забезпечувати можливість виявляти порушення нормального режиму, своєчасно виявляти та локалізувати виникаючі пошкодження. Давачами інформації є вимірювальні трансформатори струму та напруги, датчики контролю стану вводів високовольтного обладнання, температури та вологості трансформаторної оливи. Проведення безперервної обробки та аналізу первинної інформації, що надходить від підсистеми цифрової реєстрації, в реальному часі дозволяє своєчасно виконувати основні функції моніторингу стану силових трансформаторів, вимірювальних трансформаторів напруги та силових вимикачів змінного струму. Одночасність отримуваної інформації дозволяє проводити моніторинг вимикачів фідерів контактної мережі, ліній ДПР та СЦБ одночасно зі станом автоматики та релейного захисту цих приєднань.

Завдяки застосуванню стандартних апаратно-програмних засобів, обмін даними виконано локальною обчислювальною мережею із захистом від

несанкціонованого доступу, що у поєднанні з синхронізацією вимірювань дозволило локальні таймери цифрових реєстраторів привести у відповідність до супутникових сигналів системи GPS та сформувати в СМОЕ єдину часову шкалу.

Отримані в дисертаційній роботі результати дістали підтвердження в дослідах, проведених на лінії СЦБ «Бобрик – Дарниця» Південно-Західної залізниці на тяговій підстанції «Бобрик». Перші зразки СМОЕ впроваджені на тягових підстанціях «Бобрик», «Іскорость» та «ім. Т. Шевченка».

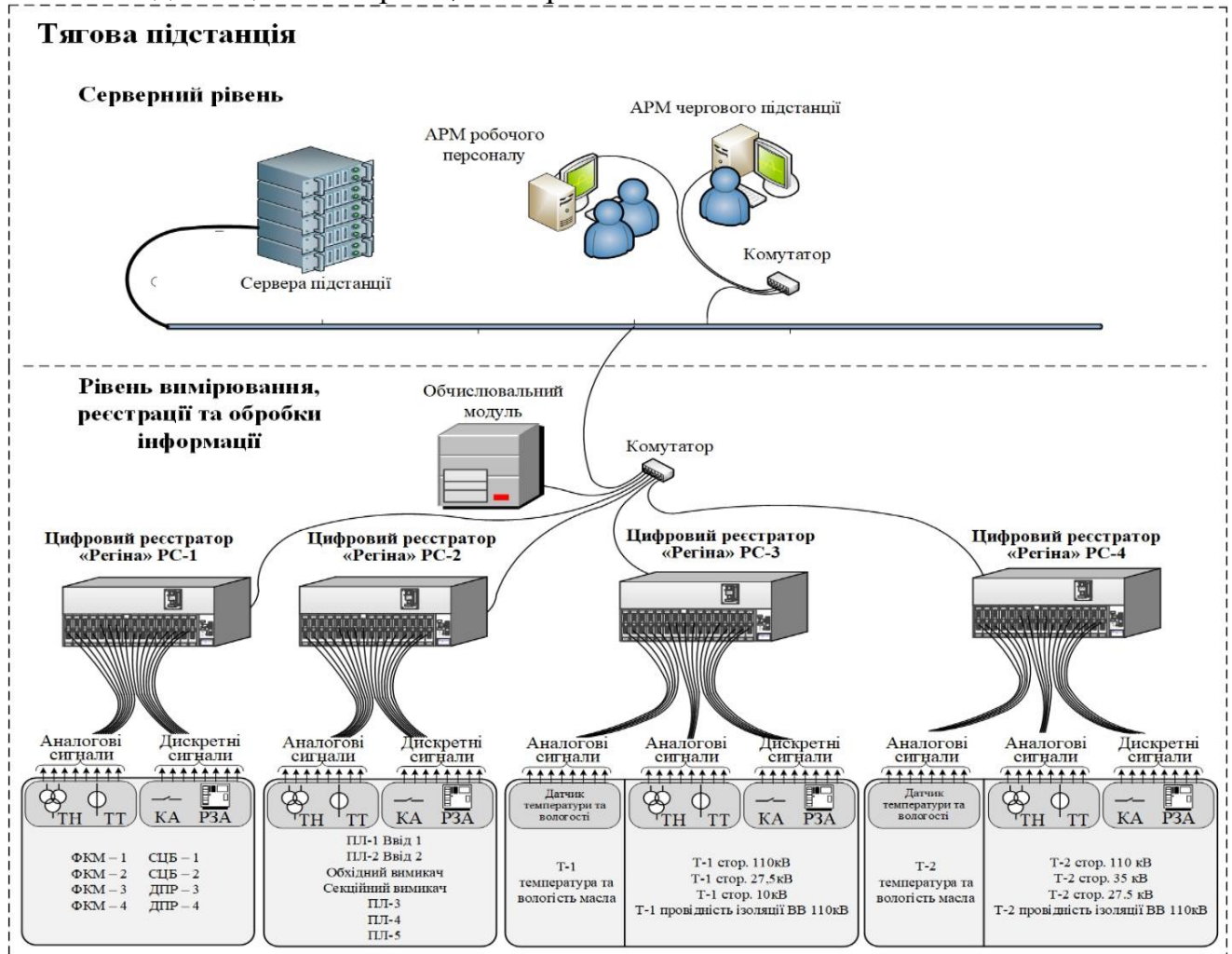


Рис. 7. Структура СМОЕ рівня тягової підстанції

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язане важливе для господарства електрифікації та електропостачання залізниць України завдання розвитку науково-технічних основ створення інтегрованої галузевої системи моніторингу електротехнічного обладнання тягових підстанцій і електричних мереж Укрзалізниці в напрямку розробки вимог, принципів виконання, побудови та впровадження системи, включно з розробкою нового методу визначення місця однофазного замикання на землю на лініях сигналізації, централізації та блокування залізничного транспорту, що дало змогу забезпечити оперативний персонал повною та достовірною інформацією про стан електроенергетичних об'єктів залізниць, підвищити

надійність та ефективність функціонування господарства електропостачання, якість та безпеку роботи рухомого складу залізниць.

Основні наукові та практичні результати роботи.

1. Аналіз практики експлуатації впроваджених більш як на 150 тягових підстанціях Укрзалізниці локальних цифрових пристроїв моніторингу параметрів режимів роботи основного електротехнічного обладнання господарства електропостачання виявив гостру потребу в розширенні переліку і покращенні якості виконуваних цими пристроями функцій, об'єднанні їх в єдину багаторівневу інформаційну мережу.

2. Досліджено характеристики і встановлено особливості одного з найвідповідальніших об'єктів моніторингу - ліній СЦБ залізничного транспорту та їх навантажень: віднесеність до першої категорії забезпечення надійності електропостачання і відповідно надто висока ціна відмов та пошкоджень, виконання з ізолюваною нейтраллю і безпосереднє сусідство з високовольтними лініями ДПР та ФКМ, нелінійність та нерівномірна розподіленість навантаження.

3. Вперше за результатами проведених експериментальних досліджень встановлено функціональні залежності параметрів робочих режимів лінії СЦБ від значення ємностей конденсаторів, увімкнених між фазами лінії та землею; відстані до місця ОЗЗ; параметрів взаємного розташування лінії СЦБ, лінії ДПР та ФКМ, що покладені в основу розробленої нової математичної моделі лінії.

4. Вперше розроблена математична модель вузла електричної мережі з лінією СЦБ, яка дозволяє врахувати електромагнітний вплив сусідніх ліній ДПР та ФКМ на струми та напруги лінії СЦБ.

5. Виконано експериментальні дослідження параметрів нормального, аварійного та післяаварійного режимів лінії СЦБ з підключеними між кожною з її фаз і землею ємностями та без них. Результатами цих досліджень доведено, що заземлення нейтралі живлячого лінію СЦБ трансформатора, здійснюване при визначенні місця ОЗЗ, рівноцінне заземленню нейтралі зірки трьох конденсаторів, що підключені до фаз лінії. Показано, що включення конденсаторів сприяє зниженню несиметрії напруг робочих режимів лінії СЦБ.

6. Виконано аналіз існуючих методів визначення місця ОЗЗ на повітряних лініях з ізолюваною нейтраллю розподільних електромереж напругою 6-35 кВ, за результатами якого встановлено необхідність розробки нового методу визначення місця ОЗЗ на лініях СЦБ, оскільки жоден з розглянутих відомих методів не спроможний врахувати особливості цих ліній та їх навантаження і забезпечити достовірне визначення місця пошкодження.

7. Розроблено новий метод автоматичного визначення місця ОЗЗ на лініях СЦБ залізниць, реалізація якого не потребує відключення лінії, дозволяє зменшити час і витрати на пошук місця пошкодження, підвищити точність визначення відстані до нього.

8. Розроблено технічні вимоги, принципи побудови, визначені функції та структура багаторівневої Інтегрованої системи моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці.

9. Результати роботи впроваджено у промисловому виробництві базового елемента Інтегрованої системи моніторингу - апаратно-програмного комплексу «Регіна», в якому реалізовано розроблений автором метод визначення місця ОЗЗ на лініях СЦБ.

10. Інтегровану систему моніторингу впроваджено на 3-х тягових підстанціях Укрзалізниці, що дало змогу забезпечити оперативний персонал максимально повною та достовірною інформацією про стан електроенергетичних об'єктів і таким чином підвищити надійність, безпеку та ефективність функціонування господарства електропостачання залізниць і залізничного транспорту.

11. Достовірність та практичне значення отриманих в роботі результатів у вигляді наукових положень і висновків підтверджується коректним застосуванням теоретичних і експериментальних методів досліджень, спрямованих на розв'язання поставлених в дисертації задач, результатами порівняння параметрів різних режимів роботи лінії СЦБ, одержаних розрахунком за її математичною моделлю і під час експериментальних досліджень, а також практикою експлуатації впровадженої системи моніторингу на тягових підстанціях Укрзалізниці.

12. Подальше використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи доцільно здійснювати шляхом подальшого розширення впровадження розробленої системи для моніторингу параметрів обладнання електроенергетичних об'єктів Укрзалізниці, а також при підготовці наукових та перепідготовці інженерних кадрів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стогній Б.С., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф. Моніторинг стану ліній 10(6) кВ сигналізації, централізації та блокування електрифікованих залізниць. *Технічна електродинаміка*. 2016. №1. С. 40-46. (входить до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST). *Здобувачем розроблена математична модель електричної мережі електропостачання для проведення досліджень з визначення місця однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю.*

2. Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення відстані до місць однофазних замикань на повітряних лініях. *Технічна електродинаміка*. 2016. №4. С. 83-85. (входить до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST). *Здобувачем проведено розробку методу та створення структури системи визначення відстані до місця замикання фази на землю та визначення опору в місці замикання повітряних ліній у нерозгалужених мережах з ізольованою нейтраллю.*

3. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Вибір алгоритму визначення відстані замикання на землю та необхідних для цього інформаційних складових параметрів режиму. *Праці ІЕД НАН України*. 2017. №48. С. 22-26. (входить до міжнародної наукометричної бази ELIBRARY). *Здобувачем проведено подальшу розробку методу визначення*

відстані до місця замикання на землю повітряної лінії в мережі з ізолюваною нейтраллю з використанням результатів експериментальних досліджень.

4. Сопель М.Ф., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення місця однофазного замикання на землю в умовах електромагнітного впливу на повітряні лінії сигналізації, централізації та блокування залізниць. *Технічна електродинаміка*. 2019. №1. С. 50-54. (входить до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST). *Здобувачем проведено аналіз чинників впливу на точність визначення відстані до замикання на землю в лініях з ізолюваною нейтраллю в умовах електромагнітного впливу від сусідніх ліній.*

5. Стогній Б.С., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Вдосконалення методу визначення місця однофазного замикання на лініях сигналізації, централізації та автоблокування залізниць. *Технічна електродинаміка*. 2020. №1. С. 48-57. (входить до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST). *Здобувачем вдосконалено метод визначення відстані до місця замикання на землю.*

6. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Тутик В.Л., Сорочинський В.В., Дячук С.Я., Стасюк О.І., Михайлевський О.С. Підсистема моніторингу і вводу дискретної інформації інформаційно-діагностичного комплексу Регіна: патент на корисну модель №73365 Україна, МПК G06F 11/00; заявл. 16.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. *Здобувачем обґрунтовано доцільність застосування шифратора для вводу дискретної інформації.*

7. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Тутик В.Л., Михайлевський О.С., Панов А.В., Стасюк О.І., Тарасевич П.Й., Войтов Д.В. Мікропроцесорна система моніторингу і прогнозу залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів: патент на корисну модель №73398 Україна, МПК G07C 3/10; заявл. 23.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. *Здобувачем зроблено аналіз впливу запасу надійності по струму та тиску газу на глибину діагностування технічного стану елегазових вимикачів.*

8. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Тутик В.Л., Стасюк О.І., Камінський Р.Б., Пилипенко Ю.В., Дячук С.Я., Панюшкін О.М. Система синхронізації функціонування засобів вимірювання та автоматизації в енергетиці: патент на корисну модель №73434 Україна, МПК G06F 17/18; заявл. 28.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. *Здобувачем визначено параметри синхронного вимірювання первинних сигналів режимів функціонування енергосистеми.*

9. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Стасюк О.І., Довгодько Ю.М., Сорочинський В.В., Михайлевський О.С. Підсистема моніторингу і вводу аналогової інформації інформаційно-діагностичного комплексу Регіна: патент на корисну модель №81842 Україна, МПК G06F 17/18; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.07.2013, Бюл. №13. *Здобувачем обґрунтовано доцільність застосування шифратора для вводу аналогової інформації.*

10. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В., Панов А.В., Тутик В.Л., Стасюк О.І. Мікропроцесорна система моніторингу параметрів ізоляції високовольтних вводів силових трансформаторів: патент на корисну

модель №108206 Україна, МПК G06F 11/00; заявл. 22.12.2015; опубл. 11.07.2016, Бюл. №13. *Здобувачем проведено розробку алгоритмів та структури системи автоматичного контролю ізоляційних характеристик основної ізоляції високовольтних вводів силових трансформаторів.*

11. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Гребченко М.В., Стретович В.М., Максимчук В.Ф., Стасюк О.І., Пилипенко Ю.В., Тутик В.Л. Мікропроцесорна система визначення відстані до місця замикання на землю в нерозгалуженій системі з ізолюваною нейтраллю напругою 6-35 кВ: патент на корисну модель №116005 Україна, МПК G06F 11/00; заявл. 08.09.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9. *Здобувачем проведено розробку методу та створення структури системи визначення відстані до місця замикання фази на землю та визначення опору в місці замикання повітряних ліній у нерозгалужених мережах з ізолюваною нейтраллю.*

12. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Пилипенко Ю.В., Максимчук В.Ф. Створення глобальної інформаційної системи безперервного моніторингу та діагностування тягових підстанцій змінного та постійного струму електрифікованих залізниць України. *Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції* [«Інтелектуальні енергетичні системи ESS'11»] (Київ 7-10 червня 2011) / Національна академія наук України, Інститут електродинаміки. 2011. С. 72-77. *Здобувачем розроблено структуру глобальної інформаційної системи безперервного моніторингу та діагностування тягових підстанцій електрифікованих залізниць.*

13. Максимчук В.Ф., Сопель М.Ф., Стогній Б.С. Система моніторингу стану обладнання тягових підстанцій. *Тезиси 7-го міжнародного симпозиуму* [«Електрифікація і розвиток інфраструктури енергообеспечення тяги поїздів швидкісного і високоскоростного залізничного транспорту Eltrans'2013»] (Санкт-Петербург 8-11 жовтня 2013) / Санкт-Петербург: ПГУПС. 2013. С. 65-66. *Здобувачем проведено розробку алгоритмів моніторингу стану основного електротехнічного обладнання.*

14. Пилипенко Ю.В., Максимчук В.Ф. Розвиток оперативно-інформаційного комплексу служб електропостачання. *Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції* [«Електрифікація залізничного транспорту Траснелектро – 2015»] (Одеса 29 вересня – 2 жовтня 2015) / Д.: ДНУЗТ. 2015. С. 51-52. *Здобувачем розроблено структуру діючого зразка нового інтелектуального оперативно-інформаційного комплексу для отримання інформації про основні режими роботи та стан обладнання тягових підстанцій.*

15. Grebchenko N.V., Maximchuk V.F., Pylypenko Y.V. The Method of Determining Parameters of Single-Phase Fault in Network with Isolated Neutral. *Materials of 2nd International Conference* [“Intelligent Energy and Power System IEPS-2016”] (Київ 7-11 червня 2016) / Київ: «Кафедра». 2016. С. 116-118. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521880. *Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7521880>.* *Здобувачем запропоновано метод визначення однофазного замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю.*

АНОТАЦІЇ

Максимчук В.Ф. Інтегрована галузева система моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.**

Дисертація присвячена розв'язанню задачі створення і впровадження багаторівневої і багатофункціональної галузевої системи моніторингу електротехнічного обладнання тягових підстанцій і електричних мереж залізниць України.

Виходячи з результатів виконаного аналізу практики експлуатації впроваджених більш як на 150 тягових підстанціях локальних цифрових пристроїв моніторингу параметрів режимів роботи обладнання обґрунтовано нагальну потребу в розширенні переліку і покращенні якості виконуваних цими пристроями функцій та їх об'єднанні в єдину багаторівневу інформаційну мережу. Виконано математичне моделювання елементів системи централізованого автоблокування залізниць, нормальних та аварійних режимів роботи ліній живлення. Розроблено метод автоматичного моніторингу параметрів режимів і визначення місця пошкодження фази на землю ліній електропостачання пристроїв сигналізації, централізації і блокування. Розроблено технічні вимоги, принципи побудови, визначені функції, структура і створена багатофункціональна інтегрована система моніторингу обладнання господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці. Перший зразок системи впроваджено на базі трьох її тягових підстанцій.

Ключові слова: блокування, галузева система, замикання на землю, лінія живлення, моніторинг, режими нейтралі, сигналізація, тягова підстанція, централізація.

Maksymtchiuk V.F. Integrated monitoring system for Ukrzaliznytsia's railroad facilities and management equipment. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.14.02 – power stations, lines and systems. – **National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2020.**

This thesis addresses issues of developing integrated monitoring system for Ukrzaliznytsia's railroad facilities and management equipment in context of engineering requirements, implementation principles, product development and deployment. New method for 1-phase fault location in rail signalling control (RSC) was designed.

Equipment handling of local digital monitoring devices at more than 150 railroad substation has been analyzed. Urgent demand for enhancement in quantity and quality of their functions as well as merging of those devices in one multilevel information system were shown.

Numerous experiments to determine voltages, currents, loads and capacitances of RSCs had been carried out. In each case there were experiments with specially assigned capacitors between each phase and earth and without them. It has been proved that adding capacitors lessens voltage unbalance and increases accuracy of fault location.

Capacitors' values have been chosen based on RSC parameters and electromagnetic interference from nearby CSF and 27,5 kV power backup lines. That interference is based on induced voltage and emf on account of their capacitive coupling and mutual inductance.

Harmonic composition of experimental phase currents and voltages has been analyzed. Functional patterns for RSC operating mode parameters have been specified. Those patterns depend on capacitors' values; distance to location of the fault; mutual disposition of RSC, CSFs and 27,5 kV power backup line. New mathematical model was developed based on those patterns. The model uses twin-T network with isolated neutral taking into account inductance-capacitance coupling of RSC and adjacent CSFs and 27,5 kV power backup lines.

Analysis of different 1-phase fault location methods at lines with isolated neutral has been made. It has been shown that the best methods would be one-sided online ones, i.e. methods that imply usage of measuring equipment only at one end of the line and are based on usage of amplitude-phase spectrum of line's currents and voltages.

Method for automatic monitoring of RSC operating modes parameters with fault location function has been devised. This method implies adding special capacitors in each phase at the beginning of the line connected in Y-connection with earthed neutral point; measuring phase currents and voltages vectors; using residual current's vector and amplitude voltage's value of first and upper harmonics of faulty phase as main monitoring parameters. This method's implementation into traction substation equipment's monitoring system does not require tripping of the line, ensures reliability of gained data, lessens voltage unbalance, extends the work period of RSC equipment, makes it's easier and faster to locate a fault, increases accuracy of fault location.

Theoretical and practical studies of factors that affect accuracy of fault location at RSC have been carried out. Revised relationship between line's operating modes parameters and fault location parameters have been attained. Those were used to improve above mentioned method's algorithm. It has been proved that fault location's error won't exceed 1% in case of external influence's absence. Depending on presence of external factors, maximum relative error would be in -0,6...-12,8% interval.

Specifications, design concept, functions and structure of multi-functional integrated monitoring system for Ukrzaliznytsia's railroad facilities and management equipment have been provided.

Introduction of system's first sample on 3 Ukrzaliznytsia's traction substations basis has made it possible to provide operating personnel with reliable data about state and operating modes of controlled energy objects. Improved reliability, effectiveness and operational safety of railroad facilities and management equipment were achieved.

Keywords: line-to-ground fault, monitoring, neutral point connection, power supply line, RSC, traction substation.